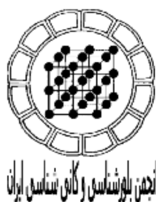
مجله
بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال سی ام، شمارهٔ سوم، پاییز ۱۴۰۱، از صفحهٔ ۵۴۳ تا ۵۵۲



مقایسه ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانوذرات $FeNi_3$ ساخته شده به روش‌های گرمابی و هم‌رسوبی

سید ابراهیم موسوی قهفرخی*، فاطمه حمل زاده احمدی

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵، نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۱/۲۳)

چکیده: در این پژوهش، نانوذرات $FeNi_3$ به دو روش گرمابی و هم‌رسوبی تهیه شدند. در روش گرمابی، اثر زمان و دماهای مختلف با مقادیر متفاوت از کاهش‌دهنده هیدریت هیدرازین بررسی گردید. سپس نمونه‌ها با پراش‌سنج پرتو x (XRD)، میکروسکوپ الکترون روبشی گسیل میدانی (FESEM) و مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی (VSM) مشخصه‌یابی شدند. نتایج الگوی پراش نشان داد که مقدار استفاده شده از هیدریت هیدرازین در تک فاز شدن نمونه‌ها بسیار مؤثر است. تصاویر FESEM نانو بودن ذرات را نشان می‌دهد، اما در بعضی از دما و زمان‌ها نانوذره تشکیل نشده‌اند یا چسبندگی و ذوب شدگی در تصاویر دیده می‌شود. نتایج VSM نشان داد که نمونه‌های تهیه شده به دو روش خاصیت مغناطیسی بالایی دارند و مغناطش اشباع آن‌ها تفاوت چندانی ندارد.

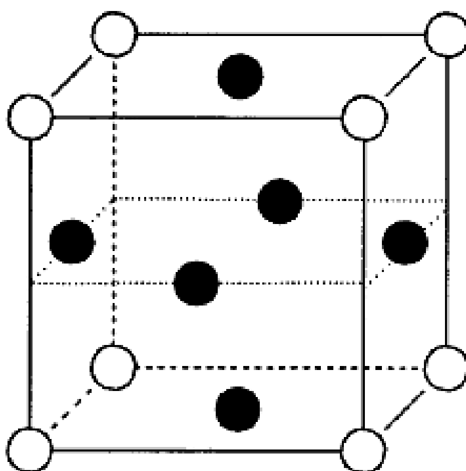
واژه‌های کلیدی: *نانو ذرات $FeNi_3$؛ روش گرمابی؛ روش هم‌رسوبی؛ ویژگی‌های ساختاری؛ ویژگی‌های مغناطیسی.*

مقدمه

در سال‌های اخیر، ساخت و بررسی نانوساختارهای مغناطیسی به دلیل ویژگی‌های خوب فیزیکی، کاتالیزوری، مغناطیسی و کاربردهای مهم آن‌ها در زمینه‌هایی چون القاگرها، مبدل‌ها، جذب امواج الکترومغناطیسی، آنتن‌ها، حسگرهای مغناطیسی، رسانه‌های ذخیره‌سازی مغناطیسی و زیست پزشکی بسیار مورد توجه است [۱]. به ویژه، پیشرفت‌های سریع دستگاه‌های ارتباطی بی‌سیم نیاز به اجزای مغناطیسی مینیاتوری (کوچک) مانند القاگرها و مبدل‌ها دارد که در بسامد بالا کار می‌کنند و این امر نیازمند آن است که مواد مغناطیسی دارای مغناطش اشباع (M_s) بزرگ، نفوذپذیری (μ) زیاد و اتلاف انرژی کم باشند. فریت‌های مغناطیسی نرم به دلیل نفوذپذیری زیاد و اتلاف انرژی کم، مواد مفیدی برای این کاربردها هستند. نانوذرات مغناطیسی فلزی چون آهن، کبالت، نیکل و آلیاژهای آن‌ها به‌دلیل مغناطش اشباع و دمای کوری بالا جایگزین ممکن برای فریت‌ها هستند [۲، ۳]. در این میان، آلیاژ Fe-Ni، به ویژه $FeNi_3$، چشم انداز خوبی برای برنامه‌های کاربردی دستگاه الکترومغناطیسی با مغناطش اشباع بالا و وادارندگی مغناطیسی کم است [۴، ۵]. ترکیب بین فلزی $FeNi_3$ در ساختار مکعبی مرکز سطحی (fcc) با گروه فضایی Pm3m نوع $AuCu_3$، با ثابت شبکه a =۰/۳۵۲۵nm متبلور می‌شود (شکل۱) [۶]. آلیاژهای نانومتری Fe-Ni با روش‌های مختلفی از جمله آلیاژسازی مکانیکی، گرمابی، تراکم گاز بی‌اثر، سل- ژل و فرآیند کاهش شیمیایی تولید شده‌اند [۷، ۸]. در سال ۲۰۰۶ نانوذرات $FeNi_3$ در دمای ^{o}C ۱۸۰ با زمان‌های ۲، ۵، و h ۱۵ ولی با مغناطش اشباع بسیار پایین توسط لیائو و همکاران ساخته شدند [۹]. گئو و همکاران نیز در سال ۲۰۱۲ نانوذرات و نانوصفحات $FeNi_3$ را با تغییر pH و مقدار هیدریت هیدرازین ساخته و ویژگی‌های مغناطیسی و ریخت‌شناسی آنها را بررسی کردند [۳]. در سال ۲۰۱۷ تائوهانگ و همکاران مغناطش اشباع حدود emu/g ۸۷/۷ را برای نانوذرات $FeNi_3$ تهیه شده به روش گرمابی در دمای ^{o}C ۱۰۰ با زمان h ۱۰ گزارش کردند [۱۰].

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۶۱۳۳۳۳۱۰۴۰، پست الکترونیکی: Musavi_ebrahim@yahoo.co.uk

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.3.12.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.3.543]



شکل ۱ یاخته یکه $FeNi_3$ دایره‌های توپر اتم‌های Ni و دایره‌های توخالی اتم‌های Fe هستند [۸].

پژوهش‌های کمی پیرامون اثر دما و زمان بر ویژگی‌های نانوذرات $FeNi_3$ انجام شده است. همچنین تاکنون ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانوذرات $FeNi_3$ تهیه شده به دو روش گرمابی و هم‌رسوبی مقایسه نشده‌اند. از این رو در این پژوهش، نانوذرات $FeNi_3$ با این دو روش و با هیدریت هیدرازین به عنوان عامل کاهش دهنده تهیه شدند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که ویژگی های ساختاری و مغناطیسی (مغناطش اشباع) این نمونه‌ها نسبت به کار دیگران بهبود یافته است.

مواد و روش‌ها

برای تهیه نانوذرات $FeNi_3$، از کلرید آهن ۴ آبه ($FeCl_2.4H_2O$)، کلرید نیکل ۶ آبه ($NiCl_2.6H_2O$)، پلی اتیلن گلیکول (PEG 6000) به‌عنوان روکنشگر و عامل پراکنده کننده، سدیم هیدروکسید (NaOH) برای تنظیم pH، هیدریت هیدرازین ($N_2H_4.H_2O$,80%) به‌عنوان عامل کاهنده و آب یون‌زدایی شده به‌عنوان حلال استفاده شد.

ساخت نانوذرات $FeNi_3$ به روش گرمابی

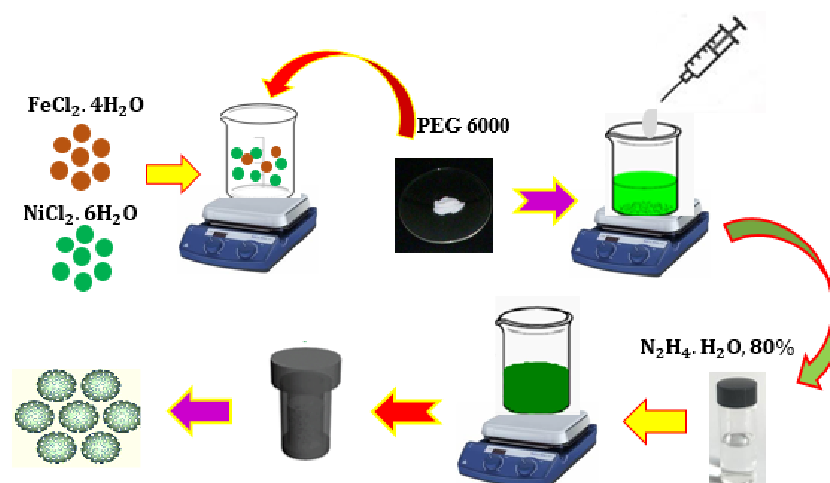
در این روش نخست، ۰٫۰۷۵ g کلرید آهن در ۳۵ ml آب یون‌زدایی شده ریخته و به مدت ۱۵ دقیقه در معرض امواج صوتی و سپس چرخش مغناطیسی قرار گرفت. پس از آن، g ۰٫۲۲۵ کلرید نیکل به محلول افزوده شد تا سوسپانسیون شفاف به‌دست آید. سپس ۰٫۰۶۹ g از پلی اتیلن گلیکول نیز به محلول اضافه و برای تنظیم pH=۱۲، از سدیم هیدروکسید استفاده شد. سرانجام هیدریت هیدرازین با دو مقدار متفاوت ۱ و ۳ ml به محلول افزوده شد. سپس سوسپانسیون به اتوکلاو تفلون ۵۰ ml منتقل شد و با مقدار هیدریت هیدرازین ۱ ml برای زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ h با دمای ۱۰۰ °C و با مقدار هیدریت هیدرازین ۳ ml برای ۱۰h در دماهای ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ °C در کوره قرار داده شد. فراورده به‌دست آمده با آب یون‌زدایی و اتانول چند بار شست‌وشو داده و سپس در دمای ۸۰ °C به‌مدت ۱۲ h در کوره خشک شد [۹، ۱۰]. فرآیند تهیه نانوذرات $FeNi_3$ به روش گرمابی در شکل ۲ نشان داده شده است.

ساخت نانوذرات $FeNi_3$ به روش هم‌رسوبی

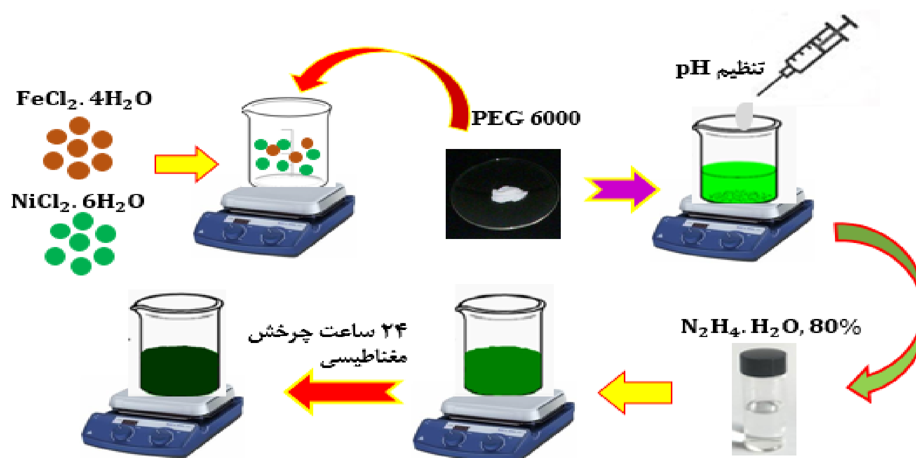
در این روش نخست، ۱٫۹۸۸ g کلرید آهن در ۲۰۰ ml آب یون‌زدایی شده به مدت ۱۵ دقیقه در معرض امواج صوتی و سپس چرخش مغناطیسی قرار گرفت. پس از آن، ۷٫۱۳۱g کلرید نیکل به محلول افزوده شد تا سوسپانسیون به‌دست آید. ۱g از پلی اتیلن گلیکول نیز به محلول اضافه و pH محلول در ۱۲ تنظیم گردید. سپس ۷٫۱ ml هیدریت هیدرازین به محلول افزوده شد و محلول به‌مدت ۲۴ h به طور مغناطیسی هم زده شد. فراورده نهایی با استفاده از آهنربا جمع‌آوری و با آب یون‌زدایی شده و اتانول شست‌وشو داده شد. نمونه‌ها در کوره ۸۰ °C به‌مدت ۱۲ h خشک شدند [۱۱]. فرآیند تهیه نانوذرات $FeNi_3$ به روش همرسوبی در شکل ۳ نشان داده شده است. فاز نمونه‌ها با پراش‌سنج پرتو ایکس (XRD)، ریختار آنها با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل‌میدانی (FESEM) و ویژگی های مغناطیسی نمونه‌ها با مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی (VSM) بررسی شد.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.3.12.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.3.543]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.3.12.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.3.543]



شکل ۲ فرآیند تهیه نانوذرات $FeNi_3$ به روش گرمابی.

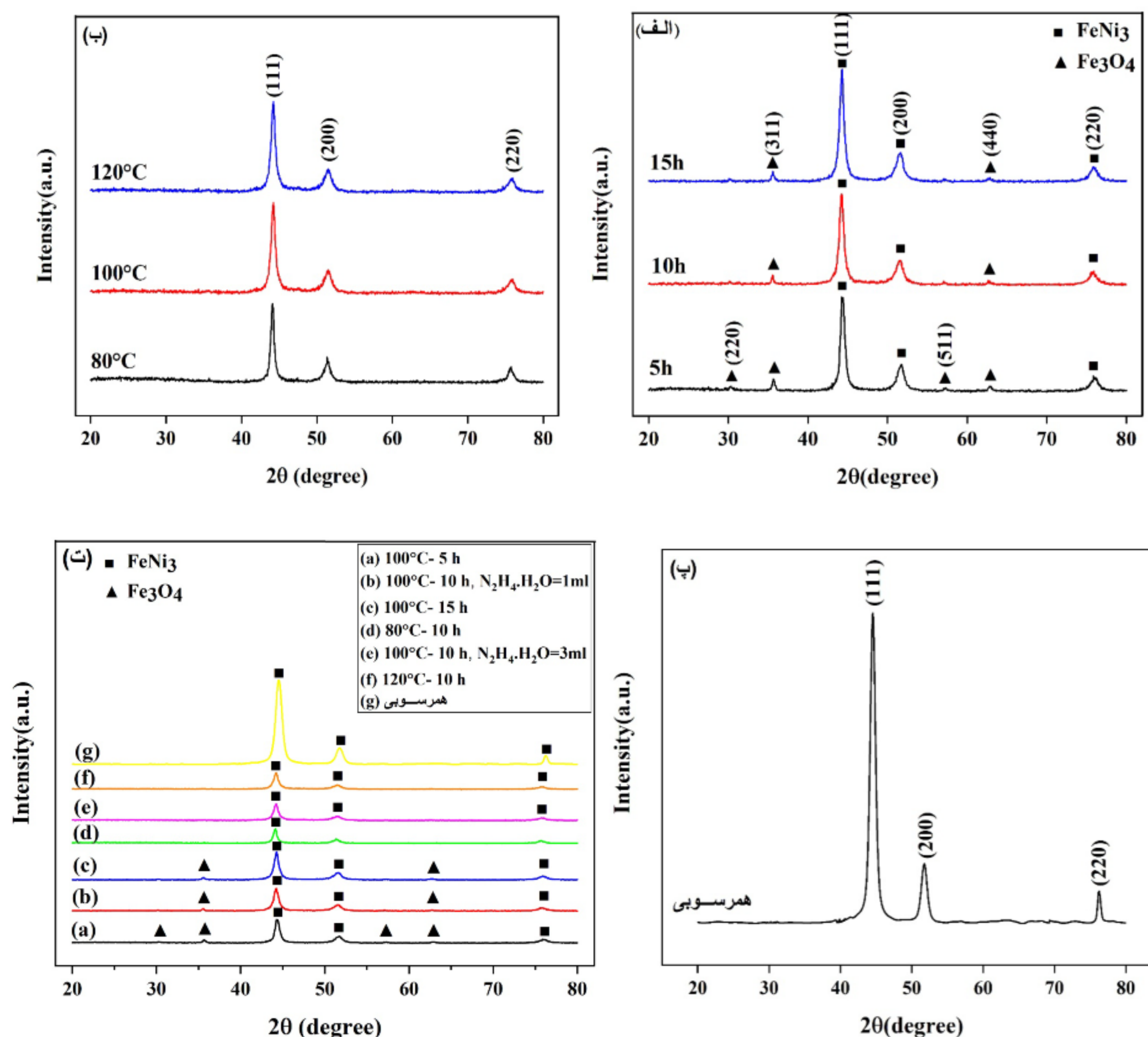


شکل ۳ فرآیند تهیه نانوذرات$FeNi_3$ به روش هم‌رسوبی.

نتایج وبحث

شکل‌های ۴ الف و ب الگوی پراش پرتو ایکس نانوذرات $FeNi_3$ تهیه شده به روش گرمابی را در گستره °۸۰-۲۰=2θ نشان می‌دهند. از الگوی پراش نمونه‌های تهیه شده با ۱ ml هیدرازین در زمان‌های مختلف (شکل ۴ الف) دیده می‌شود که در زمان‌های بالا، ناخالصی Fe_3O_4 حذف نشده است. قله‌های۳۰٫۲، ۳۵٫۶۵، ۵۷٫۲۵ و ۶۲٫۹ به‌ترتیب متناظر با صفحات (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۵۱۱) و (۴۴۰) از فاز Fe_3O_4 با شماره کارت استاندارد JCPDS- ۶۵۳۱۰۷ و قله‌های ۴۴٫۶، ۵۱٫۷ و ۷۶٫۱ به‌ترتیب متناظر با صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰) از فاز $FeNi_3$ با شماره کارت استاندارد JCPDS- ۶۵۳۲۴۴ هستند. در نمونه تهیه شده با ۳ ml هیدرازین در دماهای مختلف (شکل ۴ ب). هیچ ناخالصی وجود ندارد و فاز خالص $FeNi_3$ تشکیل شده است. بنابراین با مقایسه شکل‌های ۴ الف و ب دیده می‌شود که افزایش هیدریت هیدرازین باعث بهبود واکنش احیا و در نتیجه منجر به تولید $FeNi_3$ خالص گردیده است [۳، ۱۲].

شکل ۴ پ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه تهیه شده به روش هم‌رسوبی در گستره °۸۰-۲۰=2θ را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که این روش منجر به تولید $FeNi_3$ خالص شده است و سه قله ۴۴٫۶، ۵۱٫۷ و ۷۶٫۱ به‌ترتیب متناظر با صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰) هستند. براساس الگوهای پراش نمونه‌ها، وجود هیدریت هیدرازین در خالص بودن نمونه‌ها اثر به‌سزایی دارد. همچنین در روش هم‌رسوبی نیاز به بهینه سازی دما و زمان نیست و سریع‌تر می‌توان نمونه خالص را تهیه کرد. الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های در شکل ۴ ت مقایسه شده‌اند.



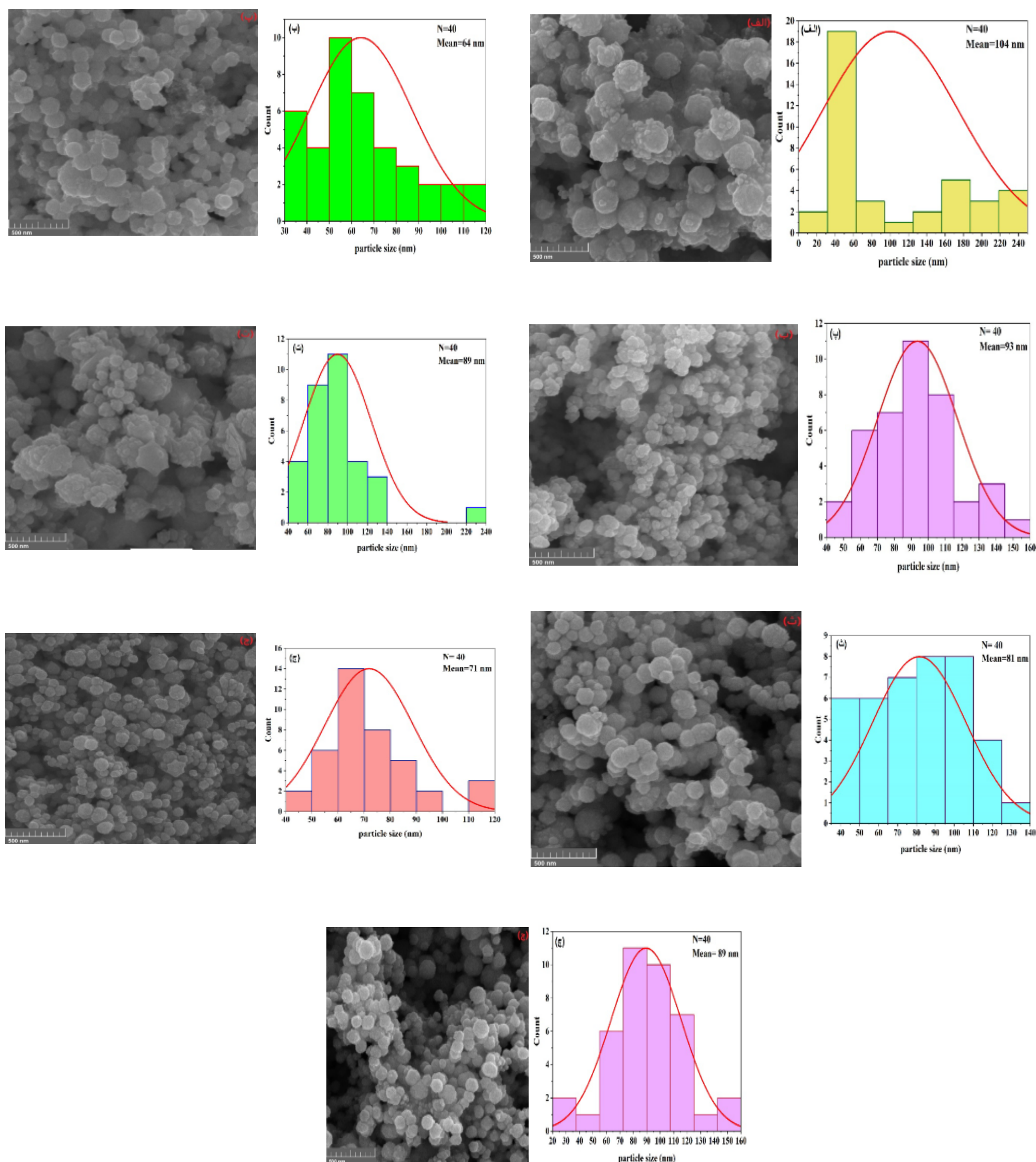
شکل ۴ الگوی پراش پرتو ایکس نانوذرات $FeNi_3$ تهیه شده با الف) دمای ^{o}C ۱۰۰ و زمان‌های ۵، ۱۰ و h ۱۵ به روش گرمابی با 1ml هیدرازین، ب) زمان h ۱۰ در دماهای ۸۰، ۱۰۰ و ^{o}C ۱۲۰ به روش گرمابی با 3ml هیدرازین، پ) روش هم‌رسوبی و ت) دو روش گرمابی و هم‌روسوبی .

به منظور ریخت‌شناسی نمونه‌ها، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی به‌همراه نمودارهای توزیع فراوانی ذرات برحسب اندازه آن‌ها در شکل ۵ آورده شده است. گفتنی است که نمودارهای ستونی اندازه ذرات با محاسبه اندازه ۴۰ ذره تصادفی از هر نمونه با نرم‌افزار Digimizer رسم گردیدند. چنان که از تصویر ۵. الف مشخص است، نمونه تهیه شده به روش گرمابی با زمان h ۵ و دمای ^{o}C ۱۰۰ یکنواخت نبوده و شامل از ذرات ریز و درشت است که متوسط اندازه ذرات این نمونه nm ۱۰۴ به‌دست آمد. این درحالی است که ریختار نمونه‌ی با زمان ۱۰h و دمای ^{o}C ۱۰۰ (شکل ۵ ب) بهتر شده و یکنواختی و چسبندگی بین ذرات کمتر شده است.

میانگین اندازه نانوذرات در این نمونه حدود nm ۶۴ محاسبه شد. با افزایش زمان پخت تا h ۱۵، ذوب شدگی کمی در تصویر این نمونه دیده شده و یکنواختی ریختار آن از بین رفته است و اندازه نانوذرات در این حالت حدود 93nm به‌دست آمد (شکل ۵ پ). از شکل ۵ ت مربوط به نمونه ساخته شده در دمای ^{o}C ۸۰ و با زمان h ۱۰ دیده می‌شود که نانو ذرات به‌طور کامل شکل نگرفته‌اند و در کنار آن‌ها نانوذرات درشت نیز وجود دارد و اندازه نانوذرات در این نمونه حدود 89nm است. تصویر ۵. ث ریخت نمونه تهیه شده در دمای ^{o}C ۱۰۰ و با زمان h ۱۰ را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که نانو ذرات $FeNi_3$ کاملاً یکنواخت تشکیل شده‌اند و اندازه متوسط ذرات 81nm است.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.3.12.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.3.543]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.3.12.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.3.543]



شکل ۵ تصاویر FESEM نانوذرات $FeNi_3$ تهیه شده به روش گرمابی با الف) ۱۰۰ ^{o}C-۵h، ب) ۱۰۰ ^{o}C-۱۰h، پ) ۱۰۰ ^{o}C-۱۵h (تصاویر الف، ب و پ با ۱ml هیدریت هیدرازین، ت) ۸۰ ^{o}C-۱۰ h، ث) ۱۰۰ ^{o}C-۱۰h، ج) ۱۲۰ ^{o}C-۱۰h (تصاویر ت، ث و ج با ۳ml هیدریت هیدرازین و تهیه شده به چ) روش هم‌رسوبی.

ریخت ذرات در نمونه ساخته شده با دمای ۱۲۰ ^{o}C و زمان ۱۰ h در تصویر ۵. ج نشان شده است؛ دیده می‌شود که نانوذرات $FeNi_3$ با یکنواختی خوبی تشکیل شده‌اند. همچنین میانگین ذرات برای این نمونه ۷۱nm به‌دست آمد. شکل ۵ چ مربوط به نمونه تهیه شده به روش هم‌رسوبی است که متوسط ذرات در این روش ۸۹nm به دست آمد؛ مشخص است که

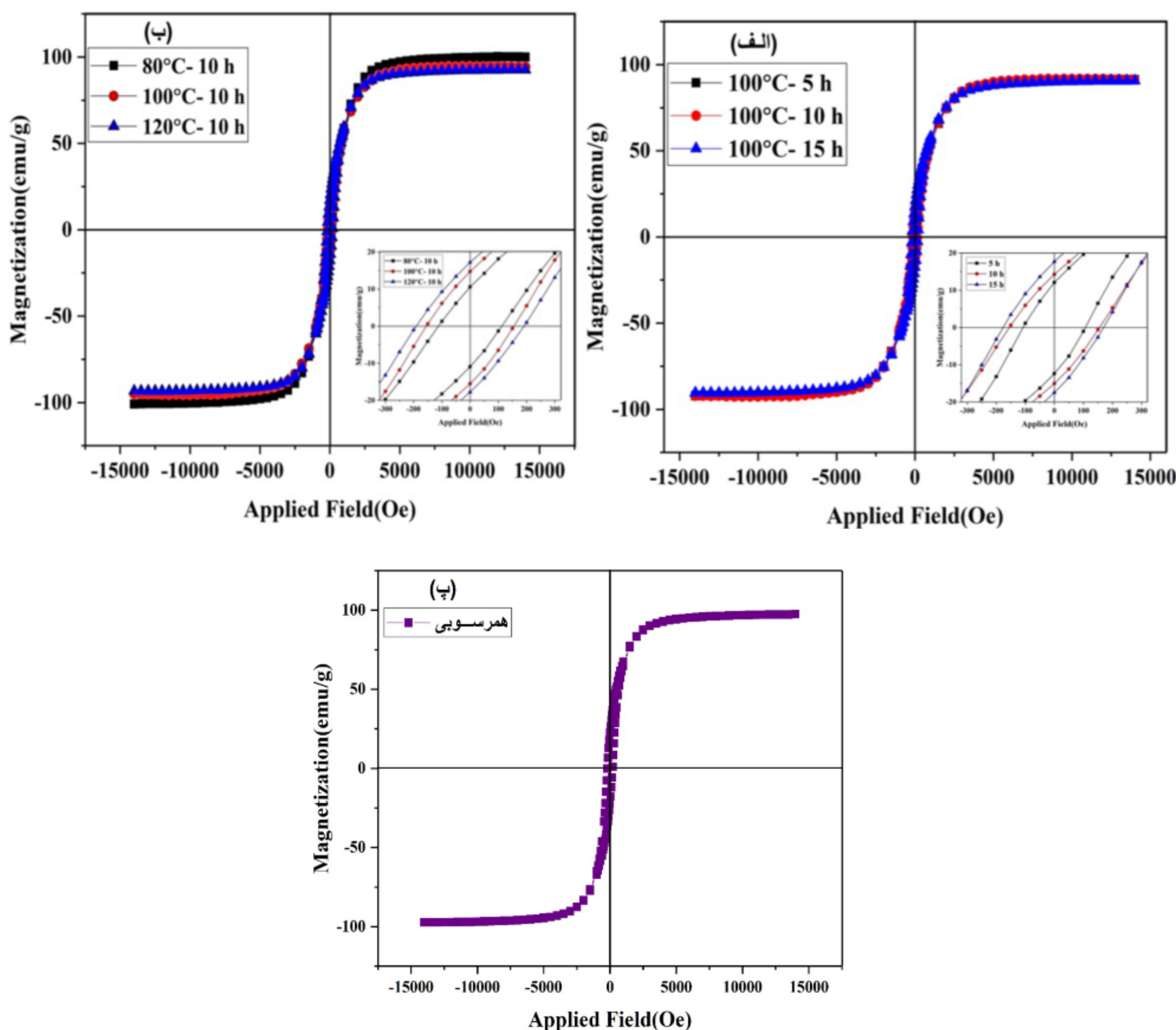
نانوذرات با یکنواختی خوبی تشکیل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهدکه نمونه‌های ساخته شده به‌روش گرمابی در دماهای ۱۰۰ و ۱۲۰ ^{o}C با زمان ۱۰ h و هم‌چنین به روش هم‌رسوبی از نظر ریخت‌شناسی و یکنواختی نانوذرات نسبت به سایر نمونه‌ها مطلوبتر هستند [۱۰، ۱۳، ۱۴].

شکل ۶ حلقه‌های پسماند نمونه‌های $FeNi_3$ تهیه شده در زمان و دماهای مختلف به روش گرمابی و روش هم‌رسوبی را نشان می‌دهد. ویژگی‌های مغناطیسی از قبیل وادارندگی مغناطیسی (H_c)، مغناطش اشباع (M_s) مغناطش پسماند (M_r)، از حلقه پسماند و میدان ناهمسانگردی بلوری (M_s) میدان وامغناطیدگی (H_d) و ثابت ناهمسانگردی مغناطوبلورین (K) از روابط زیر [۱۵، ۱۶]، محاسبه شده‌اند و نتایج در جدول ۱ آورده شده است.

$$\overrightarrow{M} = \overrightarrow{M_s}\left(1 - \frac{\overrightarrow{H_a}^2}{15\overrightarrow{H}^2}\right) \qquad (۱)$$

$$\overrightarrow{H_a} = \frac{2K}{\overrightarrow{M_s}} \qquad (۲)$$

$$\overrightarrow{H_c} = 0.48(\overrightarrow{H_a} - \overrightarrow{H_d}) \qquad (۳)$$



شکل ۶ حلقه پسماند نانوذرات $FeNi_3$ تهیه شده به الف) روش گرمابی در دما ۱۰۰ ^{o}C و زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ ساعت با ۱ml هیدرازین، ب) روش گرمابی با زمان ۱۰h در دماهای ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ ^{o}C با ۳ml هیدرازین و پ) روش هم‌رسوبی.

جدول ۱ ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌های تهیه شده به روش گرمابی با دمای ^{o}C ۱۰۰ در زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ h با ۱ml هیدرازین، با زمان ۱۰h در دماهای ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ ^{o}C با ۳ml هیدرازین و روش هم‌رسوبی.

دما و زمان	$H_c(Oe)$	$M_s(\frac{emu}{g})$	$M_r(\frac{emu}{g})$	$H_a(Oe)$	$H_d(Oe)$	$k(\frac{emu}{g}kOe)$
۱۰۰ ^{o}C-۵h	۱۰۲	۹۱/۳۸	۱۲/۱۰	۳۰۶۸/۸۹۱	۲۸۵۶/۳۹۱	۱۴۰/۲۱۷۶
۱۰۰ ^{o}C-۱۰h	۱۵۲	۹۱/۳۳	۱۴/۲۸	۳۰۳۳/۴۰۱	۲۷۱۶/۷۳۴	۱۳۸/۲۵۰۳
۱۰۰ ^{o}C-۱۵h	۱۷۳	۹۰/۶۴	۱۷/۶۹	۲۹۱۵/۶۱۳	۲۵۵۵/۱۹۶	۱۳۲/۱۳۵۶
۸۰ ^{o}C-۱۰h	۱۰۳	۱۰۰	۱۰/۵۷	۳۱۱۱/۱۸۹	۲۸۹۶/۶۰۶	۱۵۵/۵۵۹۵
۱۰۰ ^{o}C-۱۰h	۱۹۴	۹۴/۳۳	۱۴/۵	۳۰۳۸/۲۳۸	۲۶۳۴/۰۷۲	۱۴۳/۲۹۸۵
۱۲۰ ^{o}C-۱۰h	۱۹۴	۹۲/۵۹	۱۷/۲۲	۲۸۲۳/۴۴۴	۲۴۱۹/۲۷۸	۱۳۰/۷۱۱۴
هم‌رسوبی	۱۹۹	۹۷/۴۶	۲۴/۵	۲۷۰۱/۸۳۶	۲۲۸۷/۲۵۳	۱۳۱/۶۶۰۵

با توجه به این نتایج، ویژگی های مغناطیسی نمونه‌های تهیه شده با این دو روش تفاوت چندانی با هم ندارند، ولی وادارندگی مغناطیسی در روش هم‌رسوبی بهبود یافته است. برای مثال، مغناطش اشباع در این پژوهش (۱۰۰ emu/g) از کارهای انجام شده توسط مینگ لیانگ یوان و همکاران (۸۵/۲ emu/g) [۷] اس. جی. یان و همکاران (۸۵/۲ emu/g) [۱۷] و لواکسیوگنگ و همکاران (۷۵ emu/g) [۱۸] بیشتر است. هر چند مغناطش اشباع در همه نمونه‌های تهیه شده مطلوب است، ولی بعضی از آنها مغناطش اشباع بالاتری دارند. علت این امر بالا بودن درصد فاز اصلی ($FeNi_3$) است که مغناطش اشباع بالاتری نسبت به فاز دیگر (Fe_3O_4) دارد. همچنین بیشتر بودن مغناطش اشباع در نمونه تهیه شده با دمای ^{o}C ۸۰ و زمان ۱۰ h افزون بر غالب بودن فاز اصلی به دلیل ریخت شناسی این نمونه و بزرگ بودن اندازه نانو ذرات آن است، زیرا هرچه اندازه نانوذرات مغناطیسی بیشتر شود نسبت سطح به حجم کاهش و میدان وامغناطش کاهش یافته و در نتیجه باعث افزایش مغناطش آن‌-ها می‌شود [۱۹].

اندازه مغناطش اشباع نمونه‌ها، برای اطمینان از دقت افزون بر حلقه‌های پسماند، از قانون نزدیکی به اشباع (اغلب برای نمونه‌هایی که میدان مغناطیسی اعمالی کافی برای اشباع کافی نباشد) نیز محاسبه شد:

$$M = M_s\left(1 - \frac{A}{H} - \frac{B}{H^2}\right) + \chi H \qquad (۴)$$

اینجا A، B و χ به‌ترتیب مقادیر ثابت و پذیرفتاری مغناطیسی هستند که از ناهمگنی نمونه، ناهمسانگردی مغناطوبلورین و مغناطش خودبه‌خودی نمونه‌ها ناشی می‌شود. از ضرایب A و χ به‌دلیل ناچیز بودن چشم‌پوشی می‌شود [۲۰].

شکل ۷ نمودار M بر حسب $\frac{1}{H^2}$ برای همه نمونه‌های تهیه شده را نشان می‌دهد. با محاسبه عرض از مبدا هر یک از خط‌-ها، مغناطش اشباع (نظری) برای همه نمونه‌ها محاسبه گردید. مغناطش اشباع تجربی به دست آمده از حلقه پسماند با مغناطش اشباع نظری محاسبه شده براساس نمودارهای شکل ۷ به‌همراه اختلاف آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

نمودار پذیرفتاری مغناطیسی (χ) به صورت تابعی از شدت میدان مغناطیسی (H)، با استفاده از مشتق M نسبت به H ($\chi = \frac{dM}{dH}$) [۲۱] برای نمونه‌های تهیه شده به دو روش گرمابی و هم‌رسوبی در شکل ۸ آورده شده است. هر چه قله‌ها تیزتر باشند نشان‌دهنده آن است که نمونه‌ها از نظر مغناطیسی تک فازتر بوده و دارای مغناطش بالایی هستند. فازها را می‌توان به توزیع ناهمگن کاتیونی، نقص‌ها و تهی جاهایی که از نواحی با ناهمسانگردی مغناطیسی بیشتر ناشی می‌شود نسبت داد [۲۲، ۲۳]. چنان که از نمودارهای شکل ۸ الف مشخص است همه نمونه‌ها تقریباً تک‌فاز مغناطیسی هستند.

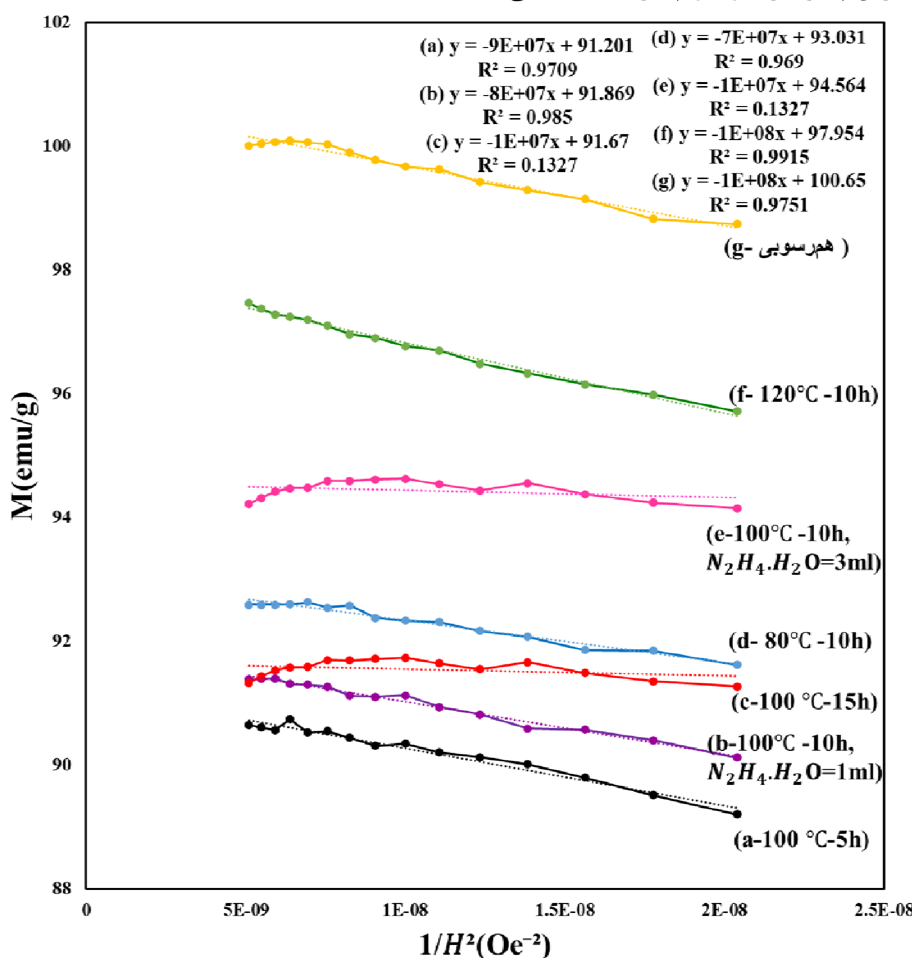
نفوذپذیری مغناطیسی (μ) نمونه ها از داده‌های پذیرفتاری مغناطیسی و با رابطه زیر [۲۴] به دست آمد:

$$\mu = \mu_0(1 + \chi) \qquad (۵)$$

نمودار نفوذپذیری مغناطیسی به صورت تابعی از شدت میدان مغناطیسی (H)، برای نمونه‌های تهیه شده به روش‌های گرمابی و هم‌رسوبی در شکل ۹ آورده شده است. چنان که دیده می‌شود، این نمودارها شبیه نمودارهای پذیرفتاری هستند.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.3.12.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.3.543]

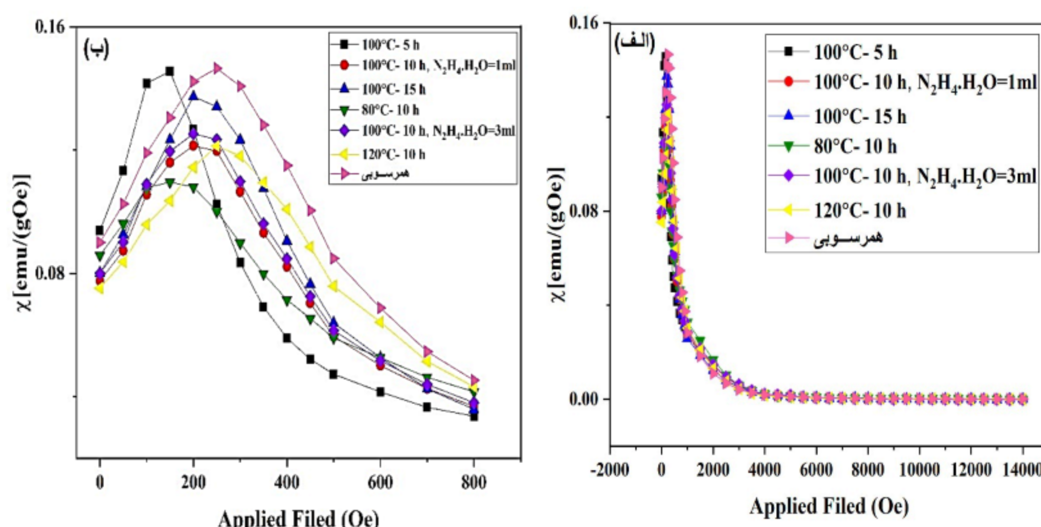
مقادیر پذیرفتاری و نفوذپذیری مغناطیسی نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است. دیده می‌شود که پذیرفتاری و نفوذپذیری مغناطیسی نمونه‌ها اختلاف چندانی با هم ندارند، زیرا مغناطش این نمونه‌ها تفاوت قابل ملاحظه‌ای نداشته‌اند. براساس شکل-های ۸.ب و ۹.ب، بیشترین پذیرفتاری و نفوذپذیری مغناطیسی نمونه‌ها در میدان‌های مغناطیسی اعمالی کم است؛ در نتیجه این نمونه‌ها در میدان مغناطیسی کم دارای مغناطش اشباع بالایی هستند و می‌توانند در میدان‌های مغناطیسی کم شار مغناطیسی زیادی را به خوبی از خود عبور دهند.



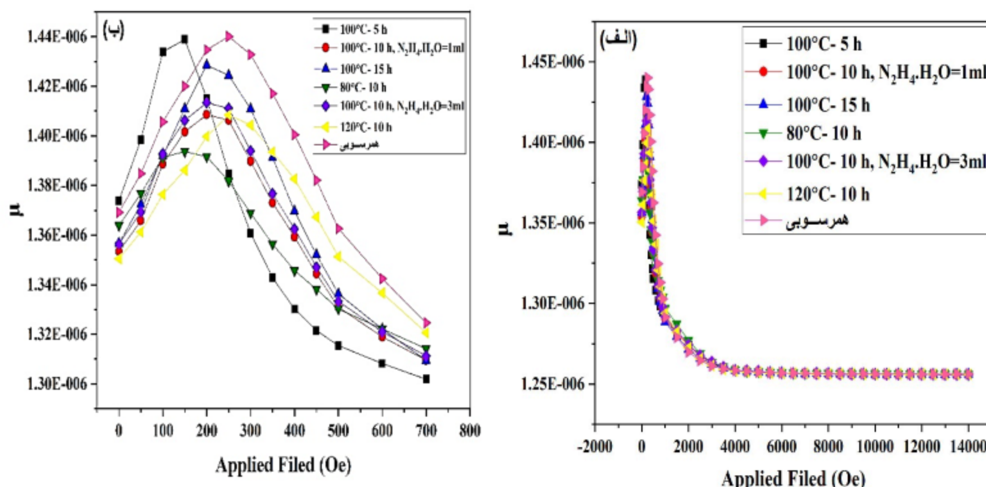
شکل ۷ نمودار $M\text{-}\frac{1}{H^2}$ نانوذرات $FeNi_3$ تهیه شده به روش‌های گرمابی و همرسوبی.

جدول ۲ مغناطش اشباع تجربی و نظری، مقدار اختلاف آن‌ها، پذیرفتاری مغناطیسی (χ) و نفوذپذیری مغناطیسی (μ) نمونه‌های تهیه شده به روش گرمابی با دمای ^{o}C ۱۰۰ در زمان‌های ۵، ۱۰ و h ۱۵ با ۱ml هیدرازین، با زمان h ۱۰ در دماهای ۸۰، ۱۰۰ و ^{o}C ۱۲۰ با ۳ml هیدرازین و روش همرسوبی.

دما و زمان	M_s تجربی	M_s نظری	مقدار اختلاف	χ	μ
۱۰۰ ^{o}C-۵h	۹۱/۳۸	۹۱/۸۶	۰/۵۲	۰/۱۴۵	۰/۰۰۰۴۳۸
۱۰۰ ^{o}C-۱۰h	۹۱/۳۳	۹۱/۶۷	۰/۳۷	۰/۱۲۱	۰/۰۰۰۴۰۸
۱۰۰ ^{o}C-۱۵h	۹۰/۶۴	۹۱/۲	۰/۶۱	۰/۱۳۷	۰/۰۰۰۴۲۴
۸۰ ^{o}C-۱۰ h	۱۰۰	۱۰۰/۶۵	۰/۶۴	۰/۱۰۹	۰/۰۰۰۳۹۳
۱۰۰ ^{o}C-۱۰ h	۹۴/۳۳	۹۴/۵۶	۰/۲۴	۰/۱۲۵	۰/۰۰۰۴۱۳
۱۲۰ ^{o}C-۱۰ h	۹۲/۵۹	۹۳/۰۳	۰/۴۷	۰/۱۲۱	۰/۰۰۰۴۰۸
همرسوبی	۹۷/۴۶	۹۷/۹۵	۰/۵	۰/۱۴۶	۰/۰۰۰۴۴۰



شکل ۸ نمودار پذیرفتاری مغناطیسی نانوذرات $FeNi_3$ تهیه شده به روش‌های گرمابی و هم‌رسوبی.



شکل ۹ نمودار نفوذپذیری مغناطیسی نانوذرات $FeNi_3$ تهیه شده به روش‌های گرمابی و هم‌رسوبی.

برداشت

نانوذرات $FeNi_3$ به دو روش گرمابی و هم‌رسوبی تهیه شدند. نمونه‌ها در روش گرمابی در زمان‌ها و دماهای مختلف با دو مقدار ۱ و ۳ میلی‌لیتر از هیدریت هیدرازین ساخته شدند. بررسی ویژگی‌های ساختاری نمونه‌ها نشان داد که مقدار عامل کاهنده (هیدریت هیدرازین) در تک فاز شدن نمونه‌ها بسیار موثر است. براساس تصاویر FESEM، نمونه تهیه شده به روش گرمابی با زمان ۱۵ h و دمای ۱۰۰ ^oC دارای ذوب‌شدگی کمی است و نانوذرات $FeNi_3$ تهیه شده در دمای ۸۰ ^oC و زمان ۱۰h به‌خوبی تشکیل نشده‌اند. نانوذرات $FeNi_3$ نمونه‌های تهیه شده به روش گرمابی در سایر دماها و زمان‌ها و همچنین نمونه تهیه شده به‌روش هم‌رسوبی ریختار دارند. مغناطش اشباع برای نمونه تهیه شده به روش گرمابی در دمای ۸۰ ^oC و با زمان ۱۰h و نمونه تهیه شده به روش هم‌رسوبی نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر است. نمونه‌های تهیه شده به روش گرمابی در دماهای ۱۰۰ و ۱۲۰ ^oC با زمان ۱۰ h و نمونه تهیه شده به روش هم‌رسوبی وادارندگی مغناطیسی بیشتری دارند. بررسی‌ها نشان داد که فاز، ریختار، ویژگی های ساختاری و مغناطیسی نانوذرات $FeNi_3$ تهیه شده به روش هم‌رسوبی بدون نیاز به بهینه سازی دما و زمان نسبت به روش گرمابی مطلوب‌تر است.

مراجع

[1] Chen H., Xu C., Zhao G., Liu Y., *"Template-free formation of urchin-like FeNi3 microstructures by hydrothermal reduction"*, Materials Letters, 91 (2013) 75-77.

[2] Tang N. J., Zhong W., Jiang H. Y., Han Z. D., Zou W. Q., Du Y. W., *"Complex permeability of FeNi3/SiO2 core-shell nanoparticles"*, Solid state communications, 132 (2004) 71-74.

[3] Hongxia G., Hua C., Fan L., Zhenping Q., Suping C., Zuoren N., *"Shape-controlled synthesis of FeNi3 nanoparticles by ambient chemical reduction and their magnetic properties",* Journal of Materials Research 27 (2012) 1522-1530.

[4] Oleksakova D., Kollár P., Füzer J., *"Structure and magnetic properties of powdered and compacted FeNi alloys",* Materials Letters 91 (2013) 75–77.

[5] Ma T., Yuan M., Islam, S. M., Li H., Ma S., Sun G., Yang X., *"FeNi3 alloy nanocrystals grown on graphene: Controllable synthesis, in-depth characterization and enhanced electromagnetic performance",* Journal of Alloys and Compounds 678 (2016) 468-477.

[6] Nirouei M., Jafari A., Boustani K., *"Magnetic and structural study of FeNi 3 nanoparticles: effect of calcination temperature",* Journal of Superconductivity and Novel Magnetism 27 (2014) 2803-2811.

[7] Yuan M. L., Tao J. H., Yu L., Song C., Qiu G. Z., Li Y., Xu Z. H., *"Synthesis and magnetic properties of Fe–Ni alloy nanoparticles obtained by hydrothermal reaction",* In Advanced Materials Research 239 (2011) 748-753.

[8] Dang M. Z., Rancourt D. G., *"Simultaneous magnetic and chemical order-disorder phenomena in Fe 3 Ni, FeNi, and FeNi 3",* Physical Review B 53 (1996) 2291.

[9] Liao Q., Tannenbaum R., Wang Z. L., *"Synthesis of FeNi3 alloyed nanoparticles by hydrothermal reduction",* The Journal of Physical Chemistry B 110 (2006) 14262-14265.

[10] Han T., Xu C., Chen H., *"Simple synthesis of novel mushroom-like FeNi3 microstructures by a hydrothermal reduction",* Materials Research Innovations 23 (2019) 39-42.

[11] Lu X., Liang G., Sun Q., Yang C., *"High-frequency magnetic properties of FeNi3–SiO2 nanocomposite synthesized by a facile chemical method",* Journal of alloys and compounds 509 (2011) 5079-5083.

[12] Lu X., Liang G., Zhang Y., *"Synthesis and characterization of magnetic FeNi3 particles obtained by hydrazine reduction in aqueous solution",* Materials Science and Engineering: B 139 (2007) 124-127.

[13] Abellán G., Carrasco J. A., Coronado E., Prima-García H., *"Synthesis of FeNi 3 nanoparticles in benzyl alcohol and their electrical and magnetic properties",* Journal of sol-gel science and technology 70 (2014) 292-299.

[14] Li G., Mei Y., Hou F., *"Magnetic properties of FeNi3/NiZn-ferrite nanocomposite prepared by hydrothermal method for application in high frequency",* Ferroelectrics 521 (2017) 116-125.

[15] Amir M., Gungunes H., Slimani Y., Tashkandi N., El Sayed H. S., Aldakheel F., Baykal A., *"Mössbauer studies and magnetic properties of cubic* $CuFe_2O_4$ *nanoparticles",* Journal of Superconductivity and Novel Magnetism 32 (2019) 557-564.

[16] Sharifi Z., *"Fabrication and investigation of magnetic and structural properties of lead spinel nanoparticles",* Master Thesis, Faculty of Science Department of Physics, Shahid Chamran University of Ahvaz (1395).

[17] Yan S. J., Zhen L., Xu C. Y., Jiang J. T., Shao W. Z., *"Microwave absorption properties of FeNi3 submicrometre spheres and SiO2@ FeNi3 core–shell structures",* Journal of Physics D: Applied Physics 43 (2010) 245003.

[18] Lu X., Wu J., Huo G., Sun Q., Huang Y., Han Z., Liang G., *"Protein-passivated FeNi3 particles with low toxicity and high inductive heating efficiency for thermal therapy",* Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 414 (2012) 168-173.

[19] Patil R P, Waghmare M B, Chikalkar M G, Delekar S D., *"Effect of Sintering Temperature on Structural, Morphological, and Magnetic Properties of Nickel Ferrite Prepared via a Polyol Method",* Macromol. Symp 393 (2020) 2000178.

[20] Mousavi Ghahfarokhi S. E., Ahmadi M., Kazeminezhad I., *"Effects of* Bi^{3+} *Substitution on Structural, Morphological, and Magnetic Properties of Cobalt Ferrite Nanoparticles",* Journal of Superconductivity and Novel Magnetism 32 (2019) 3251-3263.

[21] Mousavi Ghahfarokhi S. E., Hosseini S., Zargar Shoushtari M., *"Fabrication of* $SrFe_{12-x}Ni_xO_{19}$ *nanoparticles and investigation on their structural, magnetic and dielectric properties",* International Journal of Minerals Metallurgy and Materials 22 (2015) 876-883.

[22] Jacobo S. E., Herme C., Bercoff P. G. *"Influence of the iron content on the formation process of substituted Co–Nd strontium hexaferrite prepared by the citrate precursor method",* Journal of Alloys and Compounds 495 (2010) 513-515.

[23] Mousavi Ghahfarokhi S. E., Hosseini S., Zargar Shoushtari M., *"Fabrication and study of magnetic and dielectric properties of strontium hexaferite nanoparticles type M",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 2 (1394) 359-372.

[24] Cullity B. D, Graham C. D, *" Introduction to magnetic materials",* John Wiley &Sons (2011).